

STRESZCZENIE

**Analiza wpływu parametrów procesu fizycznego osadzania z fazy gazowej
z odparowaniem za pomocą wiązki elektronów EB-PVD na właściwości użytkowe
powłokowej bariery cieplnej TBC osadzonej na podłożu z nadstopu niklu**

Autor: Grzegorz Maciaszek

Promotor: dr hab. inż. Andrzej Nowotnik, prof. PRz

Słowa kluczowe: powłokowe bariery cieplne, proces EB-PVD

Streszczenie:

W pracy przeprowadzono badania mające na celu ocenę wpływu parametrów procesu EB-PVD oraz stanu powierzchni międzywarstwy na jakość i właściwości użytkowe powłokowych barier cieplnych (TBC) z ceramiczną warstwą wierzchnią wykonaną z tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru (YSZ). Dokonano analizy wpływu chropowatości międzywarstwy, parametrów technologicznych EB-PVD, tj. prądu emisji wiązki elektronów oraz ciśnienia w komorze roboczej na proces osadzania powłoki, jej mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne. Wykazano, że obniżenie chropowatości powierzchni międzywarstwy (wyrażonej parametrem Ra) przed procesem EB-PVD ma istotny wpływ na mikrostrukturę osadzonej warstwy ceramicznej, prowadząc do uformowania uporządkowanej struktury z wydłużonymi ziarnami kolumnowymi o regularnym kształcie i orientacji prostopadłej do podłoża. Jednocześnie wykazano, że wzrost prądu emisji wiązki elektronów, poprzez podniesienie temperatury podłoża oraz intensyfikację procesu parowania materiału ceramicznego, przyczynia się nie tylko do zwiększenia masy i grubości osadzonej warstwy, ale także sprzyja krystalizacji jednorodnych ziarn kolumnowych o orientacji wzrostu determinującej wysoką jakość powłok. Zbyt niskie ciśnienie w komorze roboczej skutkowało formowaniem powłok o niekorzystnej mikrostrukturze, z nieregularnym wzrostem ziarn i występowaniem defektów, takich jak porowatość czy boczne rozgałęzienia kolumn. Utrzymanie ciśnienia na poziomie zbliżonym do wartości standardowej sprzyjało bardziej jednorodnemu rozkładowi chmury par ceramicznych i kontrolowanemu przebiegowi kondensacji, co pozwalało na wytworzenie zwartej struktury ziarn kolumnowych. Dalsze podwyższanie ciśnienia, ograniczone możliwościami technologicznymi urządzenia, nie prowadziło do istotnej poprawy jakości powłok. Przyczepność powłok TBC oceniono za pomocą próby rozciągania próbek klejonych zgodnie z normą ASTM-C633. We wszystkich przypadkach zniszczenie następowało wewnątrz spoiny klejowej (kohezja), co oznacza, że adhezja powłoki ceramicznej do podłoża przekraczała 105 MPa. Najlepsze wyniki uzyskano dla powłok osadzanych na polerowanych międzywarstwach. Dodatkowo przeprowadzono badania odporności cieplnej w warunkach cyklicznego utleniania, które wykazały, że po 300 godzinach oddziaływania obciążeń termicznych przyczepność warstwy ceramicznej pozostawała na poziomie co najmniej 60 MPa. Wartość ta znacznie przewyższa dane literaturowe, co potwierdza wysoką jakość i trwałość powłok ceramicznych wytworzonych metodą EB-PVD.

ABSTRACT

Analysis of the influence of electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) process parameters on the functional properties of thermal barrier coatings (TBC) deposited on a nickel-based superalloy substrate

Grzegorz Maciaszek

Supervisor: DSc. Eng. Andrzej Nowotnik, Associate Professor

Key words: Thermal Barrier Coatings, EB-PVD process

Abstract:

The study focused on evaluating the influence of EB-PVD process parameters and the condition of the bond coat surface on the quality and functional properties of thermal barrier coatings (TBCs) with a ceramic top layer made of yttria-stabilized zirconia (YSZ). The analysis included the impact of bond coat roughness and key EB-PVD parameters—namely, electron beam emission current and chamber pressure—on the deposition process, coating microstructure, and mechanical performance. It was demonstrated that reducing the surface roughness of the bond coat (expressed by the Ra parameter) prior to the EB-PVD process significantly affects the microstructure of the deposited ceramic layer, promoting the formation of an orderly structure composed of elongated columnar grains with a regular shape and orientation perpendicular to the substrate. Furthermore, increasing the electron beam emission current, through elevating the substrate temperature and intensifying ceramic material evaporation, not only led to an increase in coating mass and thickness but also favored the crystallization of homogeneous columnar grains whose growth orientation contributed to the high quality of the coatings. Low chamber pressure during deposition resulted in coatings with undesirable microstructure, including irregular grain growth and the presence of defects such as porosity or lateral column branching. Maintaining the pressure near the standard EB-PVD operating value promoted a more uniform vapor cloud distribution and a controlled condensation process, enabling the formation of a dense columnar grain structure. Further increases in pressure, limited by the technical capabilities of the equipment, did not result in significant improvements in coating quality. Adhesion of the ceramic coatings was assessed using tensile testing of bonded samples according to ASTM-C633. In all cases, failure occurred within the adhesive layer (cohesion), indicating that the actual adhesion of the ceramic coating to the substrate exceeded 105 MPa. The highest adhesion values were observed for coatings deposited on polished bond coat surfaces. Additionally, thermal durability was evaluated under cyclic oxidation conditions. After 300 hours of thermal exposure, the ceramic layer retained an adhesion strength of at least 60 MPa—significantly higher than values reported in the literature—confirming the high quality and durability of ceramic coatings produced using the EB-PVD method.